

照明顯示兩相宜

OLED越來越火紅

周卓輝

無論在照明或顯示器應用上，OLED均具有相當優異的性能，造就出跨領域的獨特產品力。其在原料、製程、使用能耗、壽命終止的回收方面，都能符合綠色環保的要求，讓OLED成為新世代照明與顯示器雙重領域的焦點技術。

2009年全球平面顯示器產業的產值為850億美元(約新台幣2.8兆)，一般照明產業為900億美元(約新台幣3兆)；兩個產業規模都非常大，但卻屬於不同的產業類別。

有些技術如：陰極射線管(CRT)、液晶顯示器(LCD)、電漿顯示器(PDP)等，可以作為顯示器用途，卻不能用來照明；因此顯示與照明的應用，並不會放在一起討論。同樣的，有些技術如：電燈泡或日光燈，可以用來照明，卻不能用來作為顯示器；因此照明與顯示的應用，也不會放在一起討論。

然而有些技術，像是發光二極體(LED)，特別是有機發光二極體(OLED)，既可以應用於顯示器，又可作為照明燈具，具有得天獨厚的特性，再加上許多其它的特色

優點，將使其產品應用魅力無限，產業發展也深具前景！

本文謹就有機發光二極體(OLED)在顯示與照明的特性及應用，及其與競爭技術的比較，做一概括性的介紹，並提醒投資者，在繼「矽谷」(silicon valley)之後，以有機發光二極體為首的「有機電子谷」(organic electronics valley；OE-Valley)勢將崛起，值得留意並把握時機。

OLED的時代近了

CRT顯示技術流行了一甲子多，而至今日幾乎已被LCD給完全取代。現階段液晶顯示器的價格已越來越低，在接近四十年的風光日子之後，會不會在產業進入一個甲子之

前，被其它新進入的技術給取代？對於將平面顯示器當作主力產業的我國來說，這是應該要提前面對的議題。

至於哪種顯示技術將可取代LCD？在十年前任誰也說不準，在十年後的今天，有機發光二極體的效率，特別是白光OLED的能量效率，已經上衝到了100 lm/W，已和現行的日光燈(60~90 lm/W)相近。OLED原本的致命缺點「壽命短」，最近已被大幅改善；搭配主動式(AM)-OLED專用的薄膜電晶體(TFT)技術，也已漸趨成熟。由此可看出，OLED的時代已開始浮現。

LCD顯示器是否會因OLED的發展而考慮功成身退？這當然是不可能！至少不是現在，尤其在大尺寸產品。沒有一項技術或是產品會自動退場，除非碰到強勁的、具有侵入性的(disruptive)競爭者。在過去，LCD是CRT的強勁競爭者，LCD以其平面、輕、薄的特性優勢，大舉入侵笨重的CRT顯示產業，並進而取而代之；同樣地，OLED挾著更薄、更輕、光色驚豔動人，再加上免背光板、可低溫使用、應答快速、視角寬廣等特性優勢，侵入了傳統顯示產業，則是可預期的情勢，只是早或晚的問題罷了。

OLED二次進場投資的契機

台灣對於OLED的再次投資，是不是應該開始進場？筆者認為答案是肯定的。自1997年以來，各種小尺寸OLED產品上市，已經超過十年時間；2007年SONY正式推出11吋OLED電視，讓產業跨出新的一年。上述均可提供佐證，OLED技術已經邁向成熟、可以逐步量產的時機了。

不過問題點在於進場的時間點，現在再次投入OLED產品會不會太早了一些？筆者的答案是：不會，而且反而已有一點晚了！僅柯達一家公司，至今已經申請了近千項的專利，有重要戰略價值者，少有未被佈局之處。不過未到全面大量產之前，整個OLED領域，就彷彿當年美國移民之初所面對的廣大西部，仍有諸多尚未開發之地；此時OLED的「機會」、「領土」，就掌握在肯前往開疆闢土的拓荒好漢手裡。

目前的情況，已和十年前投資OLED量產時大不相同。當時因為幾個關鍵技術尚未成熟，可用的材料、設備很少又很貴，在應該投入研發的時候投入生產，以致資金燒盡、後繼無力。而現在正值量產與研發並起的時候，投資人反倒裹足不前，巨大資金、商機的損失，就在進退失據之間發生！

反觀起步較晚的對岸，早已開始重點佈局、重金投入，更不談鄰近的韓國，其鏗而不捨的態度，致使其PM-OLED面板與AM-OLED手機面板之產量已超越台灣，高居世界第一！讓人不自覺的替台灣的科技產業、經濟與下一代前途擔心。

然而，OLED現在進場尚不為晚，因為OLED的應用可以分成三大領域：(1)主動顯示器；(2)被動顯示器；(3)照明，各有其市場取向，尚有可與爭鋒之處。OLED產品特性可以分成兩大類：硬式與軟式，也各有其獨特商品對象與滲透方式，有利於台灣眾多中小企業的加入發展。OLED製造技術，則可以分成兩大方向：乾式與濕式；濕式方面，台灣一樣擁有極佳的製造技術基礎，稍加調整、整合，即可掌握勝出機制。此外，主動顯示

TFT的製造技術至少就有7類，哪一種技術會最後脫穎而出仍待觀察，但也已快要知曉！由此可知，此時投入OLED產業，仍有諸多創新智財可以開發；稍晚投入，就只好撿低價代工，而這應當不是台灣該走的路。

OLED將是室內照明的寵兒

由最近的研究中發現，OLED是一種非常好的照明光源，不論與白熾燈泡、螢光燈管，甚至是和LED比較，在光譜、能耗等方面均有其優異性(圖一)。

電燈泡的光譜連續、光色柔和，但因耗電、發熱，將由歐盟帶頭淘汰(表一)。省電的螢光燈管，卻有光譜不連續、光色尖起、閃爍與含汞的環保問題。

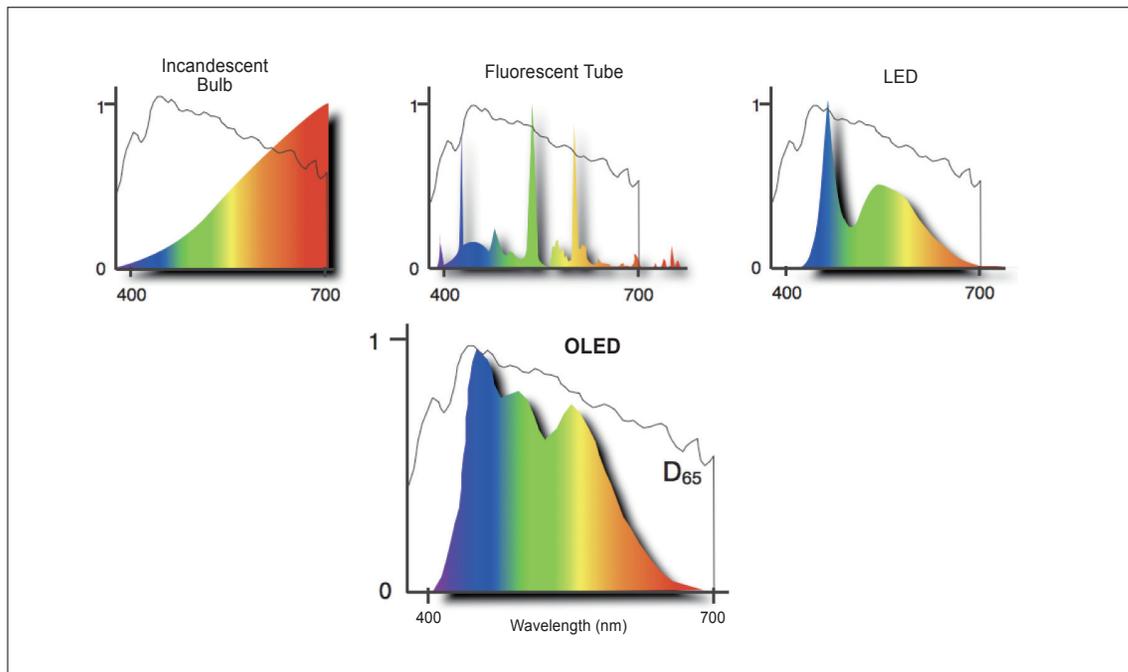
OLED的發光光譜，和自然的太陽光光譜相近。除電燈泡之外，OLED和太陽光光

譜的契合度(sunlight spectrum resemblance；SSR)，是所有光源中最高的，其沒有尖刺的光色，使光線柔和的OLED，將會是室內照明的寵兒。因為OLED的出現，勢必將會改寫人類的照明史。

OLED與LED的差異

簡單來說，有機發光二極體跟現行的發光二極體(LED)一樣，都是一種二極體，一樣會發出光來。所不同的是，有機發光二極體，使用的是碳、氫、氧、氮等永續型材料，多種元素組合，容易變化設計，目前OLED所使用的有機分子或高分子材料，都很容易大量合成、快速生產；而現行的發光二極體，使用的是無機材料，靠少數特定元素組合，必須先經高溫磊晶成長，其效能又對微量缺陷雜質極為敏感。

此外，LED所發出的光是亮度集中的點



▲圖一 OLED光源和電燈泡、螢光燈、LED光源的比較

型光，適合作為戶外或指向性光源；作為室內照明，則有眩光刺眼的問題。OLED所發出的是亮度均勻分散的面型光，其柔和擴散的光色，特別適合用作室內照明；以面型光的本質，只要稍經加工便可成為燈具，使用方便且附加價值高。

兩種光源都具有節能的特色，而同時備受全球科技產業的重視。在應用上，兩者或有可互補之處，但是在技術及市場上，依然有其相互競爭之處，孰勝孰敗目前尚不明顯，但是在近期之間，將會越來越明朗。特別在室內照明方面，產品的本質及特色，將是最後決勝的關鍵。

回首照明光源的演變

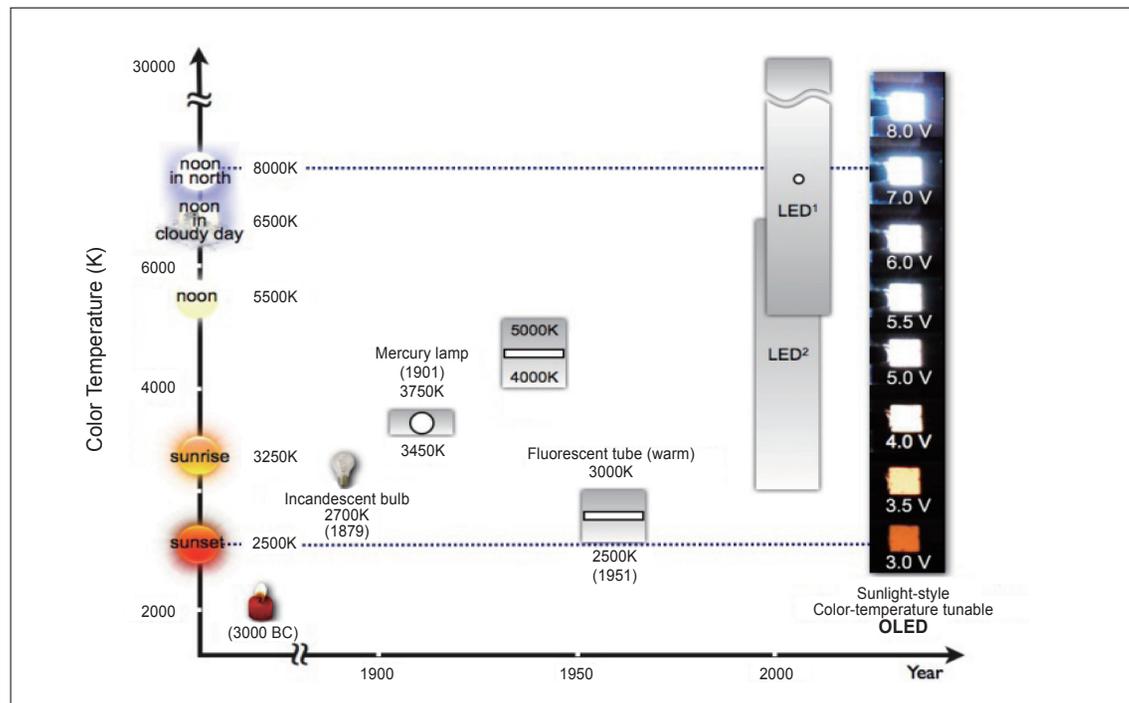
下文將從照明光源的演變，觀察OLED嶄露頭角的契機。人類使用人工照明點亮黑

▼表一 世界白熾燈泡禁用時間表

國家	政策
歐盟	2012禁止銷售傳統燈泡
美國	大多數白熾燈泡將於2014年禁止銷售
加拿大	2012年起禁用白熾燈
澳洲	2010年逐步禁止使用白熾燈泡
紐西蘭	2009年起禁用白熾光燈泡
日本	2012年停止製造和銷售高耗能白熾燈泡
台灣	2012年底全面停止使用白熾燈泡
韓國	2013年底起禁止使用白熾燈泡
中國	10年內全面禁用(禁售)白熾燈泡

夜，並引進室內使用，已有數千年的歷史。西元前三千年，埃及人開始使用蠟燭照明(圖二)。在這段時間當中，人類所仰賴的，無論是火炬、油燈或是煤油燈，都是以燃燒碳氫化合物為手段。

一直到了兩百多年前，人類發現了電；



▲圖二 人類照明演進與照明器材色溫

後在1879年發明了電燈泡，開始以電力來驅動照明。到了一百多年前，愛迪生發明了長壽命的鎢絲燈泡，人們才得以方便地使用電燈照明。然而在經過將近兩百年的演進後，人類並沒有發現更好的光源，特別是從照明品質的角度來看。

這段期間中，鈉燈在1901年被發明，雖然其效率很高，但照明品質很差，而只能用在戶外，像是隧道燈等。也因其照明品質不佳，如演色性很低等缺點，人的紅潤臉色無法顯示出來，許多隧道中的靈異怪譚，皆因鈉燈之缺陷而起。

之後，螢光燈管被發明(冷白螢光燈出現在1938年，暖白螢光燈出現在1951年)，就是俗稱的日光燈，其省電高效率的特性，陪伴了人類將近五、六十年。但是日光燈安定器的不穩定，致使燈光閃爍不停，也造成人眼的不舒服與健康問題。雖然電子安定器的出現解決了部分問題，但是日光燈放光光譜的不連續，相對於太陽所帶來的自然光，差異很大，加上日光燈產生的白光，是由兩個或三個尖起的光色所組成，儘管有所謂的70或80的演色性，然而還是難以將日光燈歸入高品質照明光源的行列。

由於人類擁有的照明光源並不多，尤其是用電來驅動的照明光源，更是寥寥可數，再加上節能與環保的考量，選擇可說是所剩無幾。在寥寥可數的光源中，尋找像自然日光般的高品質照明光源，也近乎是一種奢求，直到類太陽光OLED的發現。2009年人造太陽光源OLED誕生，所產生色溫從2,000K變化到8,000K，涵蓋3,000K的清晨曙光、5,500K的正午日光以及2,500K的落日餘暉，

開啟了人類照明的新世代。

從基本照明需求到生理健康需求

或許有人會認為「高演色性可以代表具備照明品質」，但是「演色性」的原始定義到現在還未能被清楚的定義，測定方式到最近還在修改中。演色性的計算，在高色溫與低色溫段乃使用不同的參考基準，前者使用自然光光譜，後者使用黑體輻射光譜，「演色性」就算可以當作照明品質的指標，也只能算是其中的一個指標，而非全部標準。

其實「色溫」對人的生理有重要影響，是照明光源的一個重要性能指標。研究顯示，屬於所謂低色溫的暖白光線，像是落日餘暉，有助於褪黑激素(melatonin)的產生，而褪黑激素的產生，可以幫助人體放鬆、有益睡眠；相對的，高色溫的光線，可以刺激清醒激素—可體松(cortisol)的產生。

稍加仔細觀察可知，顯示器領域所喜歡的純白光，具有6,500K的色溫，而此正是陰天中午的光色；當照明領域的人，急著將此種純白光源拿去做燈具的時候，不免讓人害怕，人已長期待在室內，又要被陰天的光色照上一天，會不會令人很「憂鬱」呢？

慶幸的是OLED很容易藉由材料選擇、元件設計而做出各種不同色溫的元件。清華大學研究團隊於2009年7月發表的「人造太陽光OLED」，更可由單一元件發出不同時間、不同氣候、不同緯度下的太陽光色、色溫。

OLED的特色

OLED獨到的優點，幾乎均為可以產生殺手級應用(killer applications)或殺手級產品

(killer products)的利基，茲簡介如後：

節能：OLED的能量效率，已超過傳統白熾燈泡，更接近螢光燈管；因為節能潛力，自2000年起美國能源部每年投入3,000萬美元(約新台幣10億)在固態照明之研發；全球三大照明製造商：Philips、Osram、GE，均參與OLED照明應用研究計畫。由於節能，也使OLED產品如手機等待機時間可拉長，增加產品優勢。

減碳：使用OLED照明，至2020年預計可以減少二氧化碳排放2.3%或670萬公噸。

無汞：OLED不含汞，而且有機分子易溶解、回收。

無紫外線：螢光燈利用汞蒸氣形成紫外線，再以紫外線激發螢光體發光，部份LED也是利用紫外線激發可見光，應用上需留意紫外線外露對人眼產生的傷害，OLED則無此問題。

無紅外線：白熾燈泡將95%的電用來產生熱與放射紅外線，因此為熱光；相對的OLED的光譜可以調控，而且幾乎不放射紅外線，故為冷型光源。

無高熱：點型光源LED，為了分散成面發光，且為了產生高亮度，而產生高熱問題，而使LED發光效率下降、使用壽命減低；相對的OLED本身即為薄片狀，容易散熱。

無眩光：OLED為平面光源，沒有光線過度集中而傷眼的

問題，特別適合用於室內或車廂內之照明，且無須特殊燈具。

對比高：OLED手機螢幕比以往的螢幕清晰許多，因為OLED的色彩對比度極高，可以做到100,000：1，甚至更高的對比度，就算在太陽下，依然可以清楚看見螢幕內容。

視角廣：OLED螢幕幾乎沒有視角限制，就算從側邊觀賞，也不會產生色彩偏差；因此OLED螢幕也可以應用在電視上，同時給多人觀看。

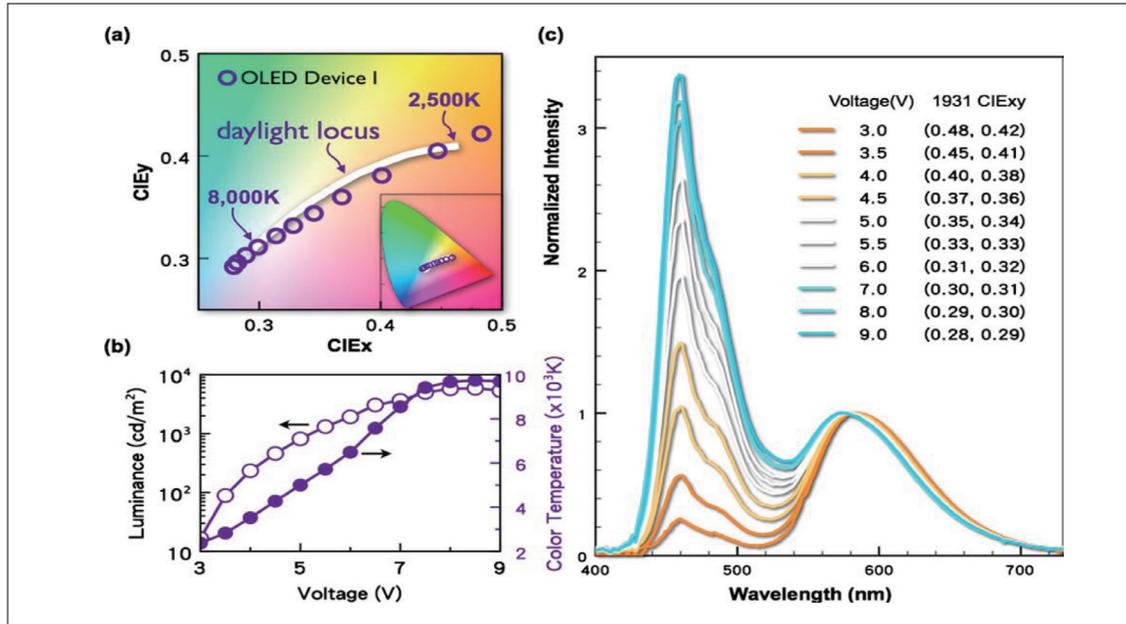
應答快：OLED的應答速度比LCD快1,000倍，因此不會有殘影滯留而影響動態畫面品質，特別適合用來觀看運動比賽或動作片。

可在低溫或高溫下使用：液晶分子在低溫或高溫下，會有失效的問題，如寒帶地區或車廂內的顯示應用時，OLED就相對適用。

不閃爍：OLED不會閃爍，可以作為護眼燈具或其它照明。



▲圖三 OLED頭帶與OLED顯示球鞋可以讓夜間慢跑更安全



▲圖四 清華大學發明之類太陽光OLED色溫變化(APL,95, 013307, 2009)，(a)類太陽光OLED所發出光色與太陽光光色軌跡的比較；(b)類太陽光OLED亮度、色溫與施加電壓的關係；(c)施加電壓對類太陽光OLED光譜的影響

原料永續：有機材料的組成元素：碳、氫、氧、氮等，大量存在於自然界中，或原油、天然氣、各樣植物中，原料來源永續不斷；尤其是氫、氧可來自水分子，氮在空氣中佔了80%，而碳又可以由擾人的二氧化碳回收。

輕而且薄：OLED輕而且薄，特別適合用於有節約燃料需求的飛機等照明，甚至適用於人體佩帶顯示(圖三)；薄薄的燈片形式，將使未來的居家設計，掀起一股嶄新的美學風潮。

驅動電壓低而安全：OLED只需幾顆小型電池或一顆9V的方型電池就可以驅動發光。因為驅動電壓低，所以在使用上，甚至隨身佩帶均非常安全(圖三)。

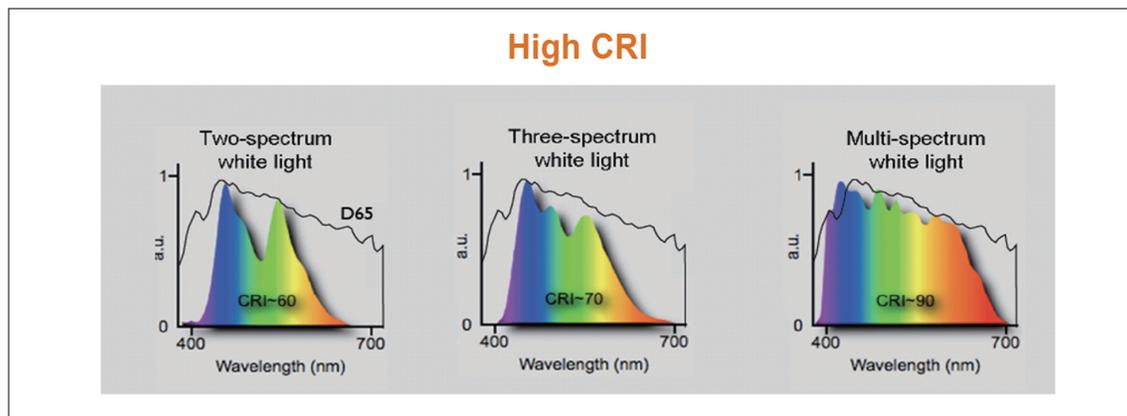
光色可調：除了可以發出各種不同色溫的白光之外，OLED也可發出各種顏色不同的單色光。

色溫可調：清華大學最近發明的仿日光 OLED，可發出類似日光的光色，其光色可以完全比照日光，色溫可以從 2,000K 變化到 8,000K，而涵蓋色溫 3,000K 的清晨曙光、5,500K 的正午日光，以及 2,500K 的落日餘暉(圖四)。這是人類首度成功以人工照明營造出日出、日落、陰天、晴天等變化氛圍，讓高緯度長夜地區，也可因此擁有像日光一般自然多變的光照。

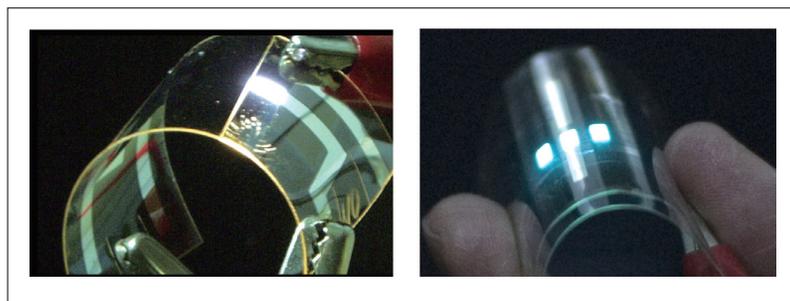
透明：OLED 顯示器或燈具也可以做成透明狀，前所未有的神奇功能，將使人類生活更加多姿多采。

明暗可調(dimnable)：OLED 燈具暗亮可任意調整，居家辦公使用均宜。

演色性高：OLED 的演色性達 95 以上(圖五)，有益提高室內攝影照像效果；其為冷



▲圖五 OLED的演色性可藉由多種染料的添加而提高，甚至經過恰當色料的搭配，可以使其光譜接近自然的太陽光光譜



▲圖六 可以彎曲而且敲不破的可攜式OLED照明元件

型光源，特別適合用來製造外科手術用探照燈。

可彎可捲：鎢絲燈泡、日光燈管、LED燈具等照明，沒有一個是可捲可彎的，直到軟性OLED技術的出現(圖六)。軟性OLED不僅可捲可撓曲，而且敲不破、打不壞，此一獨特性質將使照明產品與應用技術推陳出新，而遠遠超出現有的想像空間。

可印刷製造：OLED顯示或照明元件，可做於塑膠材質上，加上OLED元件可用印刷等方式連續製作，成本因此可大量降低，形成絕佳的競爭優勢。

風光預期超過一世紀

從顯示器的角度來看，任何一個顯示技術能夠風光一個甲子，就算是長壽的，有些技術根本無法發展這麼久。但從照明的角度來看，一個好的照明技術，卻可以風光一個世紀、兩個世紀，

白熾燈泡就是最好的例子。

但沒有一種技術可以像OLED，可以作為高級顯示器，又同時可作為優質照明光源。因為高品質，又符合節能、減碳趨勢，OLED在顯示器與照明產業，可以同時產生驚人的產值，加上OLED在農業工廠的大量使用，筆者估計其榮景至少可超過一個世紀、甚至更久的時間。

作者

周卓輝/國立清華大學材料科學工程學系教授